

Enginyeria de Forest  
PROJECTE FINAL DE CARRERA

**Comparació de les propietats  
mecàniques entre dos lots de  
Pinus nigra entre fusta en roll i  
fusta en roll amb una cara feta.**

**Alumne:** David Moliner Gil

**Tutor:** Antonio Villasante

**Departament d'Enginyeria Agroforestal**

**Juliol del 2013**

## RESUM

El present treball busca trobar si hi ha diferències significatives entre la fusta en roll i la fusta en roll amb una cara feta per a la fusta de *Pinus nigra*, en la resistència mecànica, concretament en la resistència a compressió paral·lela a la fibra i la resistència a flexió. També s'ha buscat si es pot relacionar aquestes resistències amb un mètode no destructiu com és la velocitat d'ultrasons.

**Paraules clau:** Fusta en roll, Fusta en roll amb una cara feta, Resistència a flexió, Resistència a compressió, Ultrasons.

## RESUMEN

El presente trabajo busca encontrar si hay diferencias significativas entre la madera en rollo i la madera en rollo con una cara hecha para madera de *Pinus nigra*, en resistencia mecánica, concretamente en la resistencia a compresión paralela a la fibra y la resistencia a flexión. También se ha buscado si se puede relacionar estas resistencias con un método no destructivo como es la velocidad de los ultrasonidos.

**Palabras clave:** Madera en rollo, Madera en rollo con una cara hecha, Resistencia a flexión, Resistencia a compresión, Ultrasonidos

## ABSTRACT

This paper seeks to find if there are significant differences between round wood and round wood with a face made for *Pinus nigra* in mechanical resistance, specifically parallel fiber compression strength and the bending strength. It also sought can relate these resistors with a non destructive method as the speed of ultrasound.

**Keywords:** Round wood, Round wood with a face made, Bending strength, compressive strength, Ultrasound

# ÍNDEX

1.	INTRODUCCIÓ .....	3
2.	OBJECTIU .....	5
3.	MATERIALS I MÈTODES .....	6
3.1.	Mostra d'estudi.....	6
3.2.	Equips de mesura.....	8
3.3.	Material de suport. ....	10
3.4.	Mètodes.....	11
3.5.	MÈTODES ESTADÍSTICS .....	19
4.	RESULTATS I DISCUSSIÓ.....	21
5.	CONCLUSIONS .....	29
	AGRAÏMENTS.....	30
	REFERÈNCIES .....	31

# 1. INTRODUCCIÓ

Per fusta en roll de petit diàmetre s'entén la procedent d'arbres amb diàmetres de 80 a 150 mm (de Vries, 2010) o més concretament amb menys de 23 cm de diàmetre normal (Wolfe, 2000).

Aquest material procedeix en la seva majoria de la realització d'aclarides sobre masses natural o artificials.

Un bon maneig forestal sol anar associat amb la realització d'aclarides en diverses fases del seu torn, però els elevats costos de les operacions i la falta de rendibilitat econòmica dels productes extrets sol dificultar la seva realització. Per contra la supressió d'aquests tractaments es paga en termes de sanitat i qualitat de la massa i en la pèrdua de rendiments econòmics al final de torn, al ser menor la producció de fusta de qualitat.

El disseny de productes i aplicacions rendibles per aquest material de petit diàmetre permetria ajudar a cobrir els costos de les operacions necessàries per a la seva extracció, aportaria rendes i oportunitats industrials a les poblacions rurals, ajudaria a millorar la sanitat de les masses i a minimitzar el risc i extensió dels incendis forestals (Levan-Green, 2001; Hernandez 2005).

Apart dels usos tradicionals d'aquest material, basats fonamentalment en trituració o biomassa, existeix un ús creixent en construccions rurals o decoratives, on aquest material juga un paper clarament estructural. En aquestes aplicacions estructurals la fusta pot presentar-se tant de forma massissa (postes) com reconstruïts (Scrimber<sup>1</sup>, fusta laminada, etc.).

L'ús d'elements estructurals en roll ha crescut en els últims anys degut a la construcció rural i a la rehabilitació d'estructures agropecuàries però tot i així, el mercat al que actualment aconsegueixen accedir, segueix sent petit. Un dels

---

<sup>1</sup> **Scrimber:** És una biga de fusta, formada per troncs de *Pinus radiata* de petit diàmetre, aixafats prèviament per uns corròns de pressió, i encolats entre si de tal forma que, sense destruir la estructura anatòmica de la fusta, s'aconsegueix un desfibrat groller capaç de proporcionar una superfície d'encolat gran.

motius principals d'aquest recel en el seu ús és la falta de coneixement de les característiques estructurals de la fusta en roll de petit diàmetre.

Degut a aquest fet, el present escrit s'aventurarà, com ja han fet altres autors abans (Schad, 1996; Erikson, 2000; Wolfe, 2000; Wolfe i Moseley, 2000; Levan-Green, 2001; Lindstrom, 2002) en relacionar les resistències mecàniques estudiades amb l'avaluació no destructiva de la resistència de la fusta en roll. Concretament la transmissió d'ones ultrasòniques ja que presenta els majors avantatges (Schad, 1996; Erikson, 2000; Sik Jang, 2000; Wolfe, 2000; Wolfe i Moseley, 2000; Wang 2001; Lindstrom 2002; Wang 2002).

El principi dels ultrasons aplicats a l'avaluació de les propietats de la fusta es basa en la relació que existeix entre la velocitat de propagació longitudinal de l'ona i les propietats elàstiques del mitjà que travessa (Bucur, 1984; Sandoz, 1989). La tècnica de transmissió d'ultrasons ha estat àmpliament investigada i utilitzada per a la inspecció de fusta serrada en servei (Fujii, 1990; Arriaga, 1992; Ross, 2000; Ross 2001) i per a la caracterització de fusta en roll (Wang 2001), fusta serrada (Hermoso, 2003; Arriaga, 2006; Conde 2007) i derivats de la fusta (Bekhta, 2000). Sandoz (1989) va investigar el seu ús en la determinació de la resistència de la fusta serrada estructural d'abet i va concloure la possibilitat de realitzar una classificació efectiva a partir de les dades de les velocitats mitjanes. Böstrom (1994) va estudiar i comparar la utilització de quatre mètodes de classificació automàtica de la resistència, també sobre fusta serrada d'abet, entre els que es trobava el mètode d'ultrasons, conclouent la millora de la predicció d'aquest mètode al considerar la densitat de la peça. Malgrat que el mètode de transmissió d'ultrasons sol aportar una informació de caràcter general sobre la qualitat de la peça o roll que s'avalua, mitjançant l'ús de procediments especials és possible la seva aplicació en la detecció de defectes localitzats, tals com pudricions o atacs de tèrmits (Fujii, 1990), esquerdes internes i superficials produïdes després del assecat (Fuller, 1994), presència de nusos (Karsulovic, 2000) i desviacions de fibres (Bucur, 1984; Kabir, 2001). Inclús existeixen estudis dirigits a estimar el punt local del defecte que inicia el mecanisme de trencament i que determina el mòdul de trencament (Sandoz, 2000) i l'estudi de la seva propagació (Reiterer, 2000).

## **2. OBJECTIU**

L'objectiu del present treball és determinar si hi ha diferències significatives entre la fusta en roll i la fusta en roll amb una cara feta, per a les característiques mecàniques de resistència a compressió paral·lela a la fibra i la resistència a flexió estàtica.

També es buscarà determinar si el mètode no destructiu dels ultrasons serveix per al nostre tipus de fusta i de ser així, poder formular un model que s'ajusti.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

#### 3.1. Mostra d'estudi.

La mostra es tracta d'un conjunt de 42 pals de pinassa (*Pinus nigra*), facilitats per *Fustes Borniquel*, una serradora local, procedents d'una repoblació de fa 50 anys prop de Tremp, en la qual no s'havia fet una intervenció silvícola anteriorment. El diàmetre mig dels troncs és d'11 cm, i la longitud dels pals 4,5 m.

La mostra s'ha dividit aleatòriament en dos tipus de preparació: fusta en roll i fusta en roll amb una cara feta. Per aconseguir-ho, prèviament es van marcar tots els pals de l'1 al 42, amb l'opció d'aleatorietat de la calculadora i es van marcar els 21 primers pals que van aparèixer en pantalla.

Als 21 pals marcats se'ls hi va practicar una cara a la mateixa serradora que va cedir la mostra, seguint els seus propis criteris, que són els que apliquen generalment amb aquest producte.

Segons criteris de la serradora, la utilització de la fusta en roll amb una cara feta facilita la unió entre la biga i el sostre, ja que augmenta la superfície de contacte entre els dos.

Cada subconjunt de la mostra s'ha marcat segons si es tractava de fusta en roll R1, R2, ..., R21; o fusta en roll amb una cara feta T1, T2, ..., T21.



**Figures 1 i 2:** Detall del marcat de la fusta en els dos subgrups. (Font pròpia)

La mostra s'ha deixat assecar, després d'haver estat pelada manualment amb un enformador, emmagatzemada a la intempèrie durant 4 mesos. Després d'aquest període es controla la humitat fins a obtenir-la inferior al 16%.

Cadascun dels pals s'ha tallat amb la motoserra en dos parts: una per a l'assaig a compressió paral·lela a la fibra (la part basal del roll), i l'altra per a l'assaig a flexió estàtica i els ultrasons.

La part destinada a l'assaig a flexió estàtica té una longitud de 18 cops el seu diàmetre basal més 20 cm. La resta del pal es guarden per a l'assaig de compressió. El fragment destinat a compressió es torna a tallar per a obtenir trossos de 45 cm, que finalment es tallaran amb la serra de cinta mostres de 30 cm de longitud, amb les testes paral·leles entre elles.



## 3.2. Equips de mesura.

### Assaig a compressió paral·lela a la fibra

Per a desenvolupar l'assaig a compressió paral·lela a la fibra, s'usa una premsa hidràulica (amb una capacitat màxima de 1500 kN). L'aparell ens permet usar talls amb un màxim de 450mm de llarg.

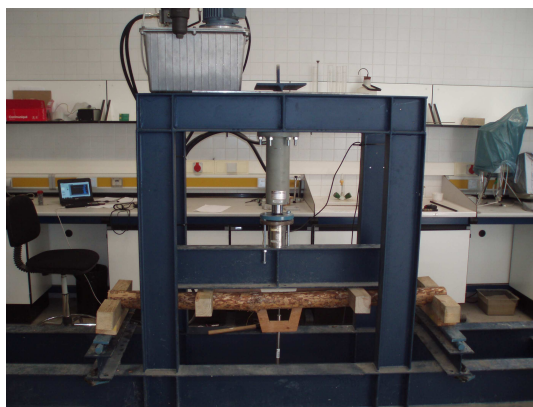
La màquina (figura 3) s'ajusta a la norma EN-14251/2004



**Figura 3:** Màquina per a realitzar l'assaig a compressió.  
(Font pròpia)

### Assaig a flexió estàtica

Per a dur a terme l'assaig a flexió es disposa d'una premsa hidràulica amb una capacitat màxima de 500 kN, suportada per una estructura que ens permet dur a terme mesures en peces d'entre 1,5 fins a 3 metres de longitud. La màquina té quatre punts de contacte amb la fusta, dos inferiors i fixes els quals anomenarem suports, i dos de superiors que s'encarregaran d'exercir la força, anomenats caps de càrrega.



**Figura 4:** Màquina per a l'assaig a flexió durant una prova.  
(Font pròpia)

## Ultrasons

L'equip SYLVATEST DUO consta de dues sondes de punta cònica, una actuant com a emissora de l'ona (freqüència de 22 kHz) i l'altra com a receptora, i una estació que recull el temps que tarda l'ona en travessar la peça de fusta (Hermoso, 2007).



**Figura 5:** Estació de captació de les dades del  
*Sylvatest DUO*. (Font pròpia)



**Figura 6:** Detall d'una de les sondes de punta cònica del *Sylvatest DUO*. (Font pròpia)

### 3.3. Material de suport.

Els principals equips de suport necessitats per a la realització de l'experiència són els citats a continuació:

*Motoserra elèctrica:* S'usa per a tallar cada pal en la part que va destinada a l'assaig a compressió paral·lela a la fibra, i la part destinada a l'assaig a flexió estàtica paral·lela a la fibra.

*Serra de cinta:* Al permetre fer talls molt més precisos, es va utilitzar per a fer els talls finals, llisos i paral·lels entre les testes (imprescindible en l'assaig a compressió paral·lela a la fibra).

*Enformador:* Es va usar per a pelar tota la mostra.

*Cinta mètrica.*

*Programa d'enregistrament:* El programa d'enregistrament usat en l'assaig a flexió és el LabVIEW 7.1.

*Balança:* El pes màxim que pot mesurar és de 2 kg i té una precisió de 1 g.

*Estufa:* S'usa per a poder assecar fragments de la mostra.

### 3.4. Mètodes.

#### **Càlcul de la humitat de la mostra i pes específic:**

Per a poder desenvolupar els assajos mitjançant la normativa UNE-EN 14251/2004, la norma ens exigeix que s'han de realitzar amb provetes condicionades en una atmosfera normalitzada de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  i  $65\% \pm 5\%$  d'humitat relativa. Una proveta està condicionada quan arriba a massa constant. Es considera que s'ha aconseguit massa constant quan el resultat de dos pesades consecutives, realitzades en un interval de 6 hores, difereixen entre si menys del 0,1% de la massa de la proveta.

Es van deixar assecar les mostres a la intempèrie, intentant evitar que els hi donés el sol directe, per evitar possibles defectes per l'acció d'un canvi brusc de la humitat com seria la presència d'esquerdes. Gràcies a la realització de pesades prèvies a l'assaig pròpiament dit, es va acceptar que la humitat màxima que podrien presentar les mostres a l'hora de realitzar l'assaig hauria de ser del 16%.

Per a calcular la humitat es seleccionaven 6 pals de diferent diàmetre de cada tipus (6 R i 6 T), s'extreien uns petits talls de 2 cm de gruix, evitant els primers 15 de les testes dels pals (on hi ha més pèrdua d'humitat) per a continuació marcar-los i pesar-los. Un cop obtinguts tots, es col·locaven a l'estufa a una temperatura de  $103^{\circ}\text{C}$  durant 24 hores. Tot seguit es tornaven a pesar. Per obtenir el percentatge d'humitat es calcula mitjançant:

$$H \% = \frac{\text{pes humit} - \text{pes sec}}{\text{pes sec}} * 100 \quad [1]$$

A mesura que es realitzen els assajos a compressió paral·lela a la fibra, i a flexió estàtica, també es va calculant la humitat i el pes específic de cada peça.

Per a calcular el pes específic però, també implica conèixer el volum de la proveta. Per a calcular-la es té en compte el diàmetre de la mostra que es considera un cercle perfecte en el cas del grup **R**, i d'un cercle restant-li el segment tallat pel grup **T**. I òbviament, també tenint en compte el gruix de la proveta.

Per a calcular el volum en el cas **R**, es mesura dos diàmetres perpendiculars entre ells, i del valor mig es calcula l'àrea, com si es tractes d'un cercle perfecte, multiplicat pel gruix s'obté el volum. El pes específic no és més que la relació entre el pes (mesurat per a la humitat) i el volum.

$$A = \left( \frac{d_1 + d_2}{4} \right)^2 * \pi \quad [2]$$

$$V = A * h \quad [3]$$

$$pe = \frac{p_h}{V} \quad [4]$$

On:

$d_1$  i  $d_2$  són dos diàmetres perpendiculars entre ells

$A$  és l'àrea

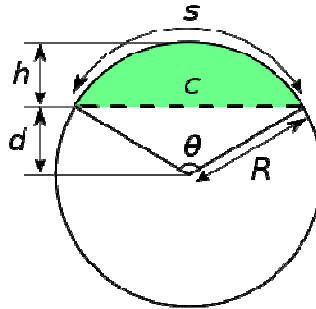
$h$  és el gruix de la proveta

$V$  és el volum

$pe$  és el pes específic

$p_h$  és el pes humit

Per a calcular el volum en el cas **T**, es mesura dos diàmetres perpendiculars entre ells i la corda (c).



**Figura 7:** Paràmetres que defineixen un segment circular.

Extret de la wikipedia:

<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circularsegment.svg> (27/05/2013)

L'àrea que ens interessa del dibuix és la blanca, i és fruit de la diferència entre l'àrea del cercle [2] i la del segment (en verd al dibuix).

L'àrea del segment la deduïm a partir de C i de R, mitjançant l'angle central  $\theta$ .

$$A = \frac{R^2}{2} (\theta - \sin(\theta)) \quad [5]$$

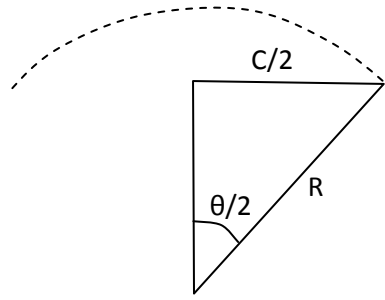
On:

A és l'àrea,

R és el radi, i

$\theta$  és l'angle central

L'angle  $\theta$  es calcula per trigonometria, a través de mig segment circular (figura 8):



**Figura 8:** Detall del triangle utilitzat per al càlcul de l'angle  $\theta$ .

(Elaboració pròpia)

Per tant:

$$\theta = 2\arcsin\left(\frac{C}{2R}\right) \quad [6]$$

### **Assaig a flexió estàtica paral·lela a la fibra.**

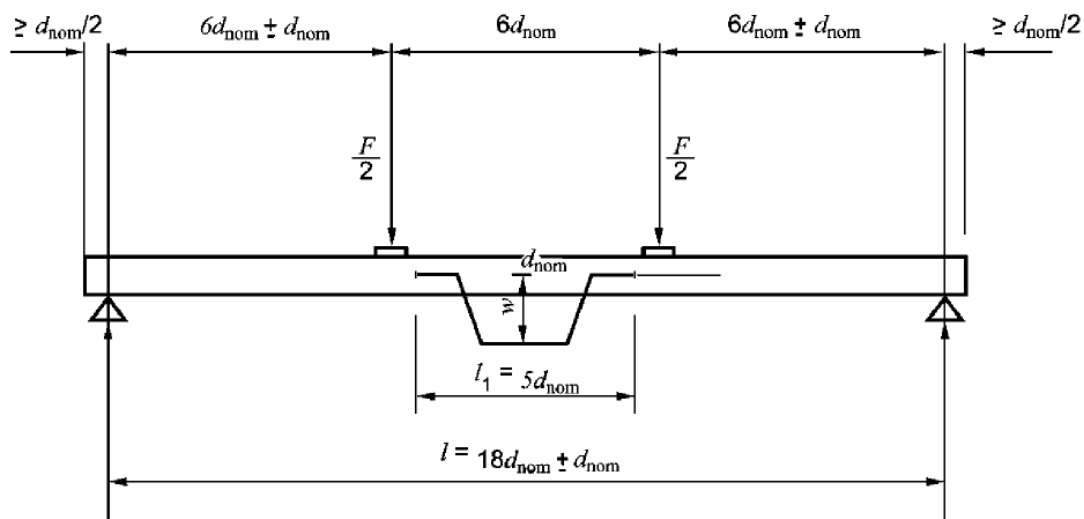
Per a desenvolupar l'assaig ens basarem en la norma europea UNE-EN 14251.

Segons la normativa, els suports han d'estar a una distància de 18 cops el diàmetre nominal<sup>2</sup>. La pressió s'ha d'efectuar de forma igual en els dos caps de càrrega. Els caps de càrrega han d'estar situats a 1/3 de la llum, de cada suport. Per tant ha d'haver 6 cops el diàmetre nominal entre cadascun dels punts de contacte respecte el/s que tenen més proper/s.

No obstant, la norma ens permet un marge igual o inferior a 3 cops del diàmetre nominal per a la llum (distància entre suports) i igual o inferior a 1,5 cops per la distància entre el suport i els caps de càrrega.

---

<sup>2</sup> **Diàmetre nominal:** Diàmetre de la mostra sense tenir en compte la cara feta.



**Figura 10:** Esquema de l'assaig a flexió. (Extreta de la norma UNE-EN 14251/2004)

Per a desenvolupar l'assaig, es retiraran tots els nusos que sobresurtin de la peça, perquè dificulten la correcta realització, i s'avaluarà els possibles defectes que presenti la fusta (principalment: quantitat i diàmetre dels nusos, i quantitat i dimensions d'esquerdes).

La fusta es col·locarà a la màquina segons les especificacions anteriorment exposades. La pressió s'ha d'incrementar de tal manera que la fusta es trenqui en 300 segons amb un marge de 120 segons. Alhora es mesurarà la deformació de la fusta mitjançant l'extensòmetre.

### Ultrasons.

Previ a la mesura de l'assaig a flexió estàtica, es mesura la velocitat de transmissió d'ultrasons mitjançant l'equip *SYLVATEST DUO*.

L'equip *SYLVATEST DUO* consta de dues sondes de punta cònica, cadascun dels capçals es col·loca a les testes dels troncs mitjançant un forat d'un centímetre que s'ha practicat gràcies a un trepant. Tal com indica Hermoso (2007), les dades no presenten diferències significatives si són efectuades albura-albura, albura-duramen i medul·la-medul·la, per tant les mesures només van tenir en compte que les dues sondes formessin una línia imaginària



paral·lela al tronc, per evitar la influència que genera l'angle de col·locació (Acuña et.al., s.a.)

### **Càlcul de la resistència a flexió.**

La resistència a flexió ve donada per la següent expressió:

$$f_{m,0} = \frac{16 F_{\max} a}{\pi d_h d_v^2} \quad [10]$$

on

- $F_{\max}$  és la càrrega total màxima dels dos caps de càrrega, en N;
- $a$  és la distància entre el punt d'aplicació de la força i el suport, en mm;
- $d_v$  és el diàmetre en la direcció de la càrrega i a la meitat de la llum, en mm;
- $d_h$  és el diàmetre en direcció perpendicular a la càrrega i a la meitat de la llum, en mm.

### **Assaig a compressió paral·lela a la fibra.**

La norma emprada per a l'assaig a flexió, UNE-EN 14251, també contempla l'assaig a compressió paral·lela a la fibra. Exigeix que la longitud de la proveta a compressió sigui de 6 cops el diàmetre nominal, en el nostre treball ens surt de l'ordre de 600mm, que sobrepassa el límit de treball amb la premsa (màxim de 450mm). Per tant, per salvar aquesta dificultat s'usaran peces amb una longitud de 300mm, igual a l'utilitzat a la norma EN 12390-3/2009 de compressió del formigó.

Per a desenvolupar l'assaig, ens basarem en la norma UNE-EN 14251/2004, amb la modificació de la longitud de la proveta, i també variarem la disposició

del tram de referència que indica la norma, i passarà a ser el total de longitud de la proveta.

Les peces tindran una longitud de 300mm, i les testes hauran d'estar cuidadosament preparades, de forma que quedin planes i paral·leles entre elles i perpendiculars a l'eix de la proveta.

Les provetes s'hauran de carregar concèntricament. Per a avaluar la deformació de la proveta es col·loca un extensòmetre que mesura el desplaçament del plat mòbil respecte un punt fix.

La fusta es col·locarà a la màquina segons les especificacions anteriorment exposades. La pressió s'ha d'incrementar de tal manera que la fusta es trenqui en 300 segons amb un marge de 120 segons.

### **Càlcul del mòdul d'elasticitat en compressió paral·lela a la fibra.**

Per a calcular el mòdul d'elasticitat en compressió s'usa la següent expressió:

$$E_{c,0} = \frac{h_0(F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)} \quad [11]$$

on

$F_2 - F_1$  és l'increment de càrrega en el tram recte de la corba de càrrega/deformació, en N;

$w_2 - w_1$  és l'increment mig de la deformació corresponent  $F_2 - F_1$ , en mm;

$h_0$  és l'altura del tram de referència, en mm;

$A$  és l'àrea de la secció transversal en la zona de trencament, en mm<sup>2</sup>.

### **Càlcul de la resistència a compressió paral·lela a la fibra.**

La resistència a compressió ve donada per la següent expressió:

$$f_{m,0} = \frac{4 F_{\max}}{\pi d_1 d_2} \quad [12]$$

on:

$F_{\max}$  és la càrrega màxima, en N;

$d_1$  i  $d_2$  són dos diàmetres perpendiculars entre sí, mesurats en la proximitat de la zona de ruptura, en mm.

## 3.5. MÈTODES ESTADÍSTICS

### Programari utilitzat

L'estudi estadístic de les dades es realitza amb el programari lliure R (<http://www.r-project.org>), mitjançant el pack de la Universitat de Càdis (R-UCA).

### Estadístics

Per a realitzar l'estudi estadístic s'han de classificar les variables en dos grups, les variables categòriques i les variables numèriques. Per variable categòrica només tenim la variable anomenada "tipus" que diferencia entre la fusta en roll, **R**, i fusta en roll amb una cara feta, **T**. Les variables numèriques són les indicades:

- Diàmetre nominal i aparent a compressió
- Diàmetre nominal i aparent a flexió
- Humitat de l'assaig a compressió i assaig a flexió
- Pes específic de l'assaig a compressió i assaig a flexió
- Mòdul d'elasticitat a compressió
- Resistència a compressió i a flexió
- Velocitat de transmissió d'ultrasons

Si es relaciona una variable numèrica amb una categòrica s'utilitza una prova ANOVA. Per a poder realitzar la prova ANOVA s'han de complir dos supòsits: supòsit de normalitat i supòsit d'homoscedasticitat. Si no compleix un dels dos supòsits es recomana usar la prova Kruskal-Wallis (UCA, 2006). Per a tots els estudis es tindrà en compte un interval de confiança del 95%

Per a comprovar el supòsit de normalitat s'utilitza el test de normalitat de Shapiro-Wilk, per a cada subgrup, és a dir R i T han de ser independentment normals, sense considerar si el conjunt de les dades són normals.

Per a comprovar el supòsit d'homoscedasticitat s'utilitza el test de Barlett, la homoscedasticitat es compleix quan la variància dels errors es constant.

Si tenim dos variables numèriques usarem l'anàlisi de regressió.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

### Característiques bàsiques de la mostra.

Els resultats per les proves de significança per a les característiques bàsiques per a detectar la possible existència de biaix en la distribució de la mostra, estan exposats en la taula 1:

Característica	P-valor	
	Anova	Kruskal-Wallis
Diàmetre nominal a compressió	0,122	-
Diàmetre nominal a flexió	0,153	-
Diàmetre aparent a compressió	0,00123 **	-
Diàmetre aparent a flexió	0,00375 **	-
Pes específic a compressió	0,260	-
Pes específic a flexió	-	0,259
Humitat a compressió	-	0,198
Humitat a flexió	-	0,03575 *

**Taula 1:** Anàlisi de significança per a les característiques bàsiques, amb un interval de confiança del 95%.

En la taula es presenten el p-valor dels diferents assajos. En el seu conjunt són significativament iguals amb un interval de confiança del 95% a excepció de la humitat a flexió i els diàmetres aparents.

La diferència de diàmetres està pensat per al subgrup **T**, el diàmetre nominal és el diàmetre que té el pal, sense tenir en compte la cara feta. En canvi, el diàmetre aparent és el diàmetre d'un cercle imaginari de superfície igual al que presenta la secció de la fusta amb la cara feta.

Un cop explicat el significat de cada tipus de diàmetre, és comprensible obtenir els resultats de la taula, ja que pel mètode emprat, sistemàticament els diàmetres aparents són inferiors.

La humitat a flexió presenta un p-valor inferior al 5%, per tant es pot considerar que la humitat és significativament diferent per a cada subgrup. La causa d'això és la major superfície de evaporació en la fusta **T**. A priori, es podria considerar que una menor humitat podria augmentar la resistència de la fusta, i per tant, alterar l'assaig. No obstant, com es comprova a la taula 4, no hi afecta.

Una altra possible causa és que la submostra destinada a flexió va restar més temps en assecat, fet que va pronunciar aquesta diferència (Taula 2).

Per tant, es podria considerar que la distribució de la mostra en les dos submostres, no presenta cap tendència en cap dels dos, i per tant, confirmem que el mètode emprat per a l'aleatorització de la mostra era correcte.

En la taula 2 es mostra el valor mig i la desviació que presenta el conjunt de la mostra, únicament distingint les submostres si són significativament diferents.

A simple vista es pot apreciar que el diàmetre nominal de la fusta destinada a compressió és substancialment més alta (entorn del 15%), això és degut al procediment de preparació de la mostra. Com ja s'ha comentat, cada element de la mostra s'ha dividit en dos parts, la part basal era la destinada a compressió, per contra l'altre extrem era destinat a flexió.

La humitat de la mostra es pot considerar lleugerament baixa en el cas de la fusta a flexió, considerant la humitat estàndard com el 12%. Aquest fet a priori curiós ja que, degut als requeriments del assaig, la fusta a flexió tenia una longitud molt més gran que no pas l'altra, es justifica per la distribució del temps. Per entendre'ns primer es va realitzar l'assaig a compressió i posteriorment el de flexió, amb una diferència de 15 dies. Tot i que, per altra banda, s'intueix que el menor diàmetre mig va permetre un assecat més breu.

El pes específic mig no presenta gaire variació entre assajos, i el valor obtingut entra dins del rang de pes específic, del 480 kg/m<sup>3</sup> de MIER (2005) fins als 620 kg/m<sup>3</sup> que té per referència CPF (2004) (de fusta jove i vella, respectivament).

Característica	Mitjana	Desviació
Diàmetre nominal a compressió (mm)	119	10,41
Diàmetre nominal a flexió (mm)	104	8,92
Diàmetre aparent a compressió "R" (cm)	121	10,32
Diàmetre aparent a compressió "T" (cm)	109	11,14
Diàmetre aparent a flexió "R" (cm)	105	8,17
Diàmetre aparent a flexió "T" (cm)	97	9,48
Humitat a compressió (%)	12,55	2,20
Humitat a flexió "R" (%)	11,63	2,71
Humitat a flexió "T" (%)	10,05	2,27
Pes específic a compressió (kg/m <sup>3</sup> )	561,2	87,41
Pes específic a flexió (kg/m <sup>3</sup> )	531,0	82,41

**Taula 2:** Valors mitjos i desviacions de les característiques bàsiques.

## Resistències mecàniques

En la següent taula 3 estan descrits els p-valors obtinguts per a les resistències estudiades:

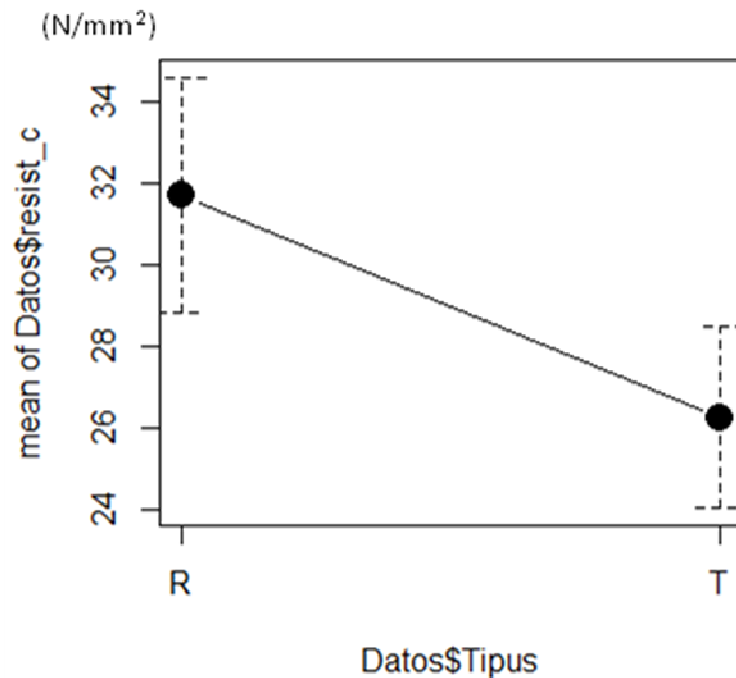
Característica	p-valor	
	Anova	Kruskal-Wallis
Resistència a compressió	0,00382	-
Resistència a flexió	-	5,567x10 <sup>-05</sup>

**Taula 3:** Anàlisi de significança per a les resistències.

En la figura 11 s'observa la mitjana amb la desviació amb un interval de confiança del 95% de les dades de resistència a compressió segons el tipus o submostra on pertany. La submostra **R** presenta uns valors clarament superiors. El límit inferior de la submostra **R** s'aproxima al límit superior de la submostra **T**, això significa que el 95% de les dades de **R** són més grans que el

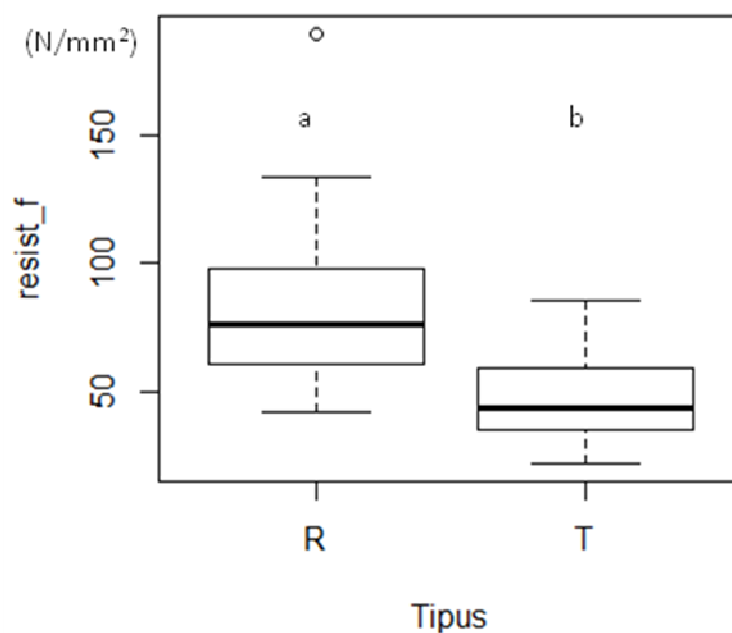


95% de **T**. Per tant, es pot confirmar que són significativament diferents, confirmat pel p-valor de la taula 3.



**Figura 11:** Gràfic de mitjanes per a la resistència a compressió i submostra, indicant l'interval del 95%

En la figura 12 es representa un diagrama de caixa de les dades de resistència a flexió. La submostra **R** presenta, major simetria i rang en la distribució, així com uns valors superiors en el seu conjunt a **T**. També s'indica que les dues submostres formen dos grups significativament diferents (taula 3).



**Figura 12:** Diagrama de caixa per la distribució de les dades per a la resistència a flexió, per a cada submostra

Els resultats obtinguts de resistència (taula 4) de la fusta entren dins del rang obtingut per altres autors, per exemple Casado (2001) té uns valors per a *Pinus pinaster* de 45,45 i 87,16 MPa (1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>) per a resistència a compressió i resistència a flexió, respectivament. Ranta-Manus (2000) presenta valors similars per a *Pinus sylvestris* (28 i 52 N/mm<sup>2</sup>), *Picea abies* (30,7 i 60 N/mm<sup>2</sup>), *Picea sitchensis* (28,6 i 58 N/mm<sup>2</sup>) i *Pseudotsuga menziesii* (33 i 52 N/mm<sup>2</sup>).

Característica	Mediana	Mitjana	Desviació
Resistència a compressió “R” (N/mm <sup>2</sup> )	-	31,70	6,33
Resistència a compressió “T” (N/mm <sup>2</sup> )	-	26,27	4,58
Resistència a flexió “R” (N/mm <sup>2</sup> )	76,17	-	-
Resistència a flexió “T” (N/mm <sup>2</sup> )	46,61	-	-

**Taula 4:** Valors mitjos i desviacions de la resistència

Si es compara amb altres autors que han treballat amb *Pinus nigra*, Fernandez-Golfín (2004) va obtenir 71,5 N/mm<sup>2</sup> per a la fusta tallada i classificada en qualitat ME-1, i 47,9 N/mm<sup>2</sup> per a la fusta tallada i classificada en qualitat ME-2. Fernandez-Golfín (2007) obté un valor de 41,2 N/mm<sup>2</sup> de resistència a flexió per a fusta tornejada, igual que Hermoso (2007) i Mier (2005) que obtenen el mateix valor.

En la resistència a compressió s'obtenen resultats significativament diferents entre les diferents submostres, amb un valor proper a 30 N/mm<sup>2</sup>, essent **R** un 5% més gran que **T** (taula 4).

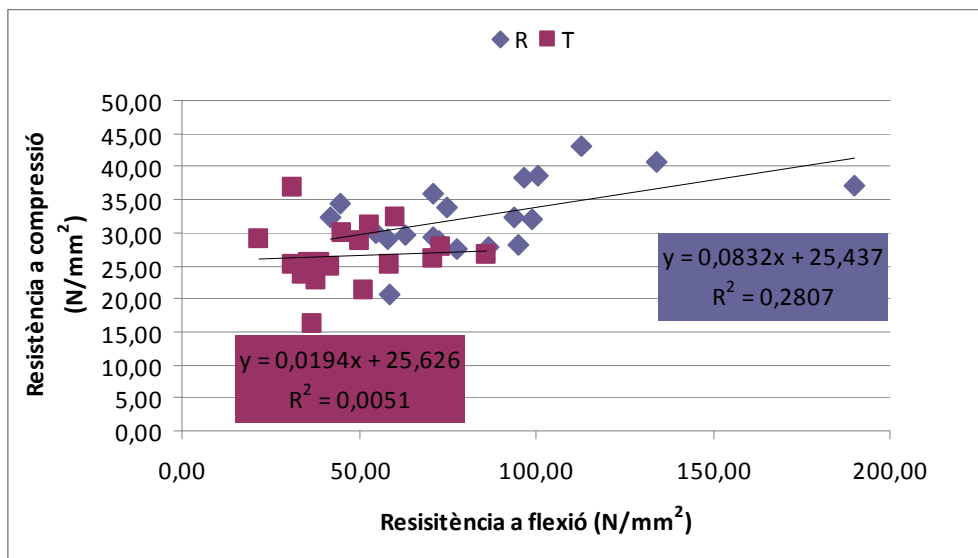
En la resistència a flexió, la diferència entre les dos submostres es fa més patent, on **R** gairebé duplica el resultat obtingut per **T**, fins i tot la diferència significativa d'humitat que es veu a la taula 1 no distorsiona el resultat esperat. L'origen d'aquesta diferència es suposa que és degut al fet de tenir una cara feta, que trenca l'estructura de la fusta, i per altra banda, la secció circular presenta una geometria que aconsegueix atenuar els efectes de l'esforç tallants, i es compensen tant les tensions internes de creixement, com aquelles concentracions perilloses del repartiment de càrregues que en una fusta serrada poden donar lloc a punts d'inici de trencament (Mier, 2005).

Tot i que no s'acaba d'ajustar completament, Mier (2005) ja ha comparat la fusta tornejada respecte l'esquadrada amb resultats favorables a l'esquadrada, igualant certes característiques mecàniques (com la secció o la inèrcia).

En canvi si la comparació s'efectua prenent la fusta tornejada i per l'altra banda la fusta esquadrada que es pot obtenir del mateix pal (que ve limitada pel diàmetre a punta fina) els resultats vindrien a ser els obtinguts per Wolfe (2000) i Wolfe i Moseley (2000). Asseguren que la seva capacitat de càrrega seria 5 cops major a la capacitat de la fusta serrada. 1,57 cops més eficaç en càrregues axials de tracció o compressió, 1,66 cops majors quant a la rigidesa i 2,35 cops en resistència.

Per això Mier (2005) pronostica que la fusta sense tornejat ha de tenir uns valors més alts en resistència degut al trencament parcial de les fibres durant el cilindrada de les troces originals, fet que podem confirmar.

S'ha buscat una relació entre la resistència a flexió i resistència a compressió amb uns resultats força decepcionants, per una banda la línia de tendència del subgrup **R** presenta una  $R^2$  baixa, de 0,2807. No obstant, es podria arribar a considerar satisfactòria si es compara amb  $R^2$  de la submostra **T**, amb un valor molt proper a 0 i per tant es podria dir que no hi ha correlació en aquest últim subgrup.



**Figura 13:** Relació entre la resistència a flexió i la resistència a compressió, per a cada submostra.

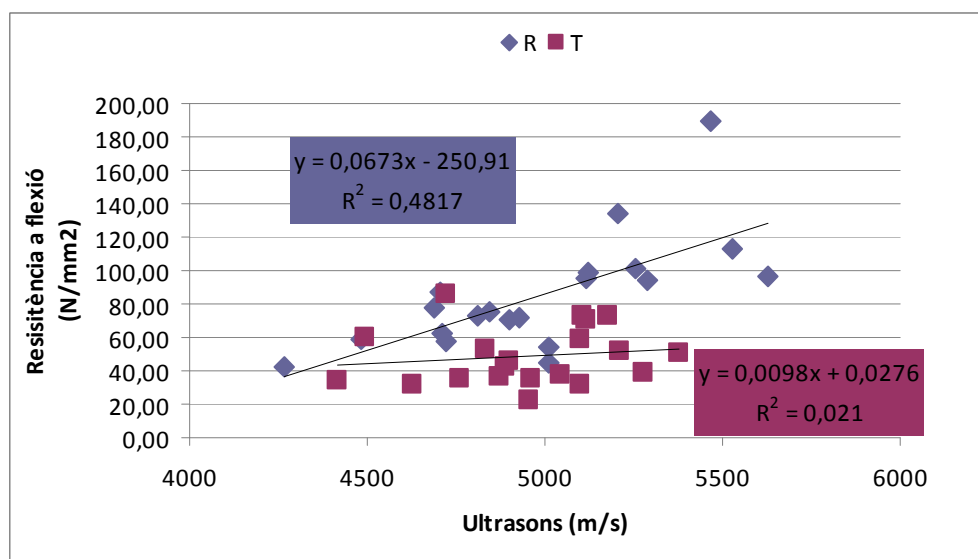
## Ultrasons

La velocitat de transmissió dels ultrasons són uns valors força constants que ronden els 5000 m/s on no hi ha diferència significativa entre la submostra **R** i la submostra **T**, el valor-p de l'ANOVA té un valor proper a 0,8. Per a poder conèixer la resistència de la fusta a partir dels ultrasons s'ha de trobar una correlació entre les dos variables com les dels gràfics (figures 14 i 15). D'aquests dos gràfics de dispersió podem adonar-nos que  $R^2$  per a la submostra **T** presenta uns valors molt propers a 0, especialment entre els ultrasons i la resistència a flexió. Aquest fet dóna a entendre que aquest mètode no destructiu no serveix per a fusta tallada asimètrica.

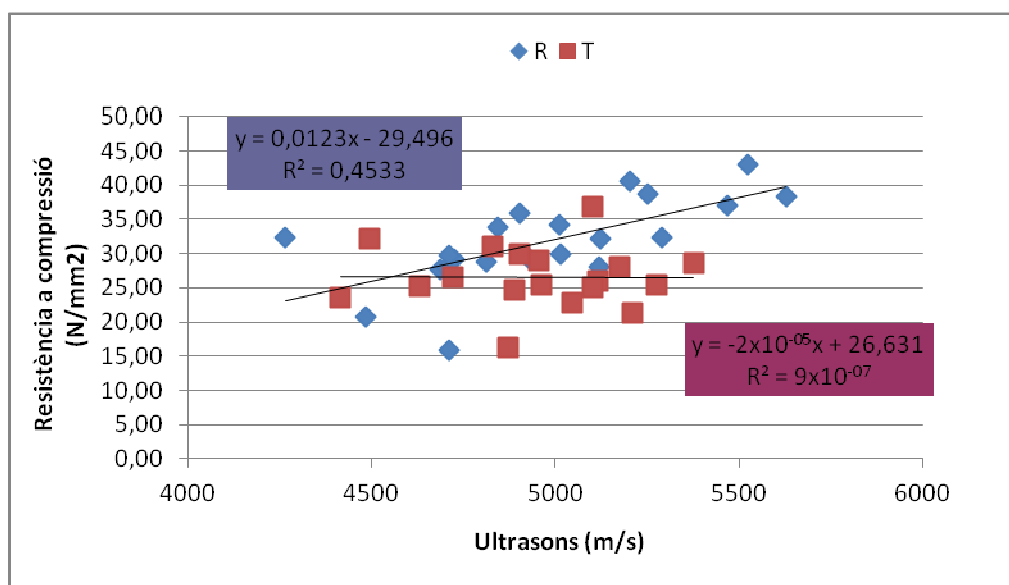
Acuña (2001) per a *Pinus sylvestris* i Hermoso (2007) per a *Pinus nigra* realitzen una regressió múltiple que relaciona el mòdul d'elasticitat amb la velocitat de transmissió dels ultrasons i el pes específic per a fusta en esquadra

i fusta tornejada respectivament, amb  $R^2$  propers a 0,7 considerant-los satisfactoris, inclús hi han assajos com el de Wang (2002) que arriben al 0,75 en *Pinus sylvestris* i 0,84 en *Larix decidua* (Jang, 2000).

Per tant, tot i que hi han hagut autors que han aconseguit crear models amb més o menys encert, creiem que amb les nostres dades no és prudent pronunciar un model de predicció de les resistències a partir de la velocitat dels ultrasons registrats ni per la fusta en roll, que no es considera prou fiable, ni per descomptat amb la fusta en roll amb una cara feta on la correlació és literalment nul·la.



**Figura 14:** Relació entre els ultrasons i la resistència a flexió, per a cada submostra.



**Figura 15:** Relació entre els ultrasons i la resistència a compressió, per a cada submostra.

## 5. CONCLUSIONS

D'acord amb els resultats obtinguts amb el present treball es pot afirmar que hi ha influència en practicar-li una cara a la fusta en roll. Per una banda les resistències, tant a compressió com a flexió presenten uns valors significativament més baixos en la fusta amb una cara feta que a la fusta en roll, arribant a un 75% més de la fusta en roll respecte la d'una cara feta en el cas de l'assaig a flexió i amb diferència més modesta del 5% en el cas de l'assaig a compressió.

Seguin els pronòstics de Mier (2005) la fusta en roll presenta unes majors resistències mecàniques, tant en compressió paral·lela a la fibra com a flexió, que la fusta que ha patit algun tipus de tractament, com el tornejat, o en el nostre cas practicar-li una cara a la fusta en roll, degut al trencament de les fibres que la formen.

La fusta en roll estudiada presenta una resistència a flexió equiparable a una serrada de categoria ME-1 de la mateixa espècie, i la fusta en roll amb una cara feta s'equipara a una fusta serrada de categoria ME-2.

En el camp de la predicció a partir dels ultrasons, els resultats han estat contradictoris. En la fusta en roll s'ha trobat un model lineal, encara que poc satisfactori, en canvi en la fusta en roll amb una cara feta no s'ha trobat cap model que permeti la predicció de la resistència de la fusta a partir dels càlculs de la velocitat de transmissió dels ultrasons, en contrast amb els resultats de diversos autors que han obtingut resultats satisfactoris tant en fusta tallada com amb secció circular (Acuña, 2001; Hermoso, 2007), per tant suposem que és degut a l'asimetria que presenta la fusta, que fa perdre més resistència de la que hauria de ser esperable.

## AGRAÏMENTS

En primer lloc, m'agradaria agrair la col·laboració d'en Joan Borniquel, de Fustes Borniquel, doncs sense la seva col·laboració no s'hagués realitzat el present treball.

També agrair al meu tutor, Antonio Villasante, sense la seva guia i ajuda, la realització d'aquest projecte hagués estat molt més complicat.

També el meu reconeixement a Lluís Puigdomenech per ensenyar-me a fer anar les màquines pels assajos, i a Josep Rius, per donar-me un cop de mà quan ho vaig necessitar.

També agrair al tribunal per la celeritat en la correcció de l'escrit, i especialment a Álvaro Fernandez, per a ajudar-me en els càlculs.

I per descomptat, agrair als meus pares i amics pel suport rebut i l'insistent "encara no l'has acabat?" que m'ha donat corda per finalitzar-lo.

## REFERÈNCIES

**Acuña L., Llorente A., Casado, M y Herrera C,** 2001. *Clasificación de la madera de Pinus sylvestris L. Mediante ensayos no destructivos.* . III Congreso Forestal Español. Granada.

**Arriaga, F.; García, L.; Gebremedhin, K. y Peraza, F.** 1992. *Estructuras de madera: restauración estudio experimental de la capacidad resistente de forjados realizados con vigas de madera.* Memoria del projecte d'investigació PAT 90-0224, Vol. I.

**Arriaga, F.; Íñiguez, G.; Esteban, M.; Fernández-Golfín, J.I,** 2006. *Structural Tali timber (Erythrophleum ivorense A. Chev., Erythrophleum suaveolens Brenan.): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods.* Holz als Roh und Werkstoff. Vol. 64, nº 5, pp. 357-362.

**Bekhta, P.; Niemz, P.; Kucera, L,** 2000. *The study of sound propagation in the wood-based composite materials.* 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, pp. 33-42.

**Böstrom, L,** 1994. *Machine strength grading: comparison of four different systems,* Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology SP Report 49, 57 p.

**Bucur, V,** 1984. *Relationship between grain angle of wood specimens and ultrasonic velocity,* Catgut Acoustical Society Inc. 41, p. 30-35.

**Casado, M.; García, M.; Acuña, L.** 2001. *Caracterización físico-mecánica del Pinus pinaster Ait. procedencia Sierra de Oña (Burgos), influencia del factor rectitud.* Actas del III Congreso Forestal Español, vol. 5, 545-553.

**Conde, M., Fernández-Golfín, J.I., Hermoso Prieto, E,** 2007. *Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual.* Aprovat per a publicació en Master de Construcció.



**De Vries, P et al**, 2010. *Development of a strength grading system of small diameter round wood*. Delf University of Technology

**Erikson, R. G., Gorman, T.M., Green, D.W., Graham, D**, 2000. *Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosa pine, and grand fir trees from northern Idaho*. Forest Products Journal 50(7-8), pp. 59-65

**Fujii, Y**, 1990. *Using acoustic emission monitoring to detect termite activity in wood*, Forest Products Journal, Vol. 40, N°1, pp. 34-36.

**Fuller, J.J.; Ross, R.J. y Damm, J.R**, 1994. *Honeycomb and surface check detection using ultrasonic nondestructive evaluation*, Res. Note FPL-RN-0261. Madison, WI: US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 6 p.

**Hermoso, E; Fernández-Golfín, J.I. y Díez, M.R**, 2003. *Evaluación de la clasificación resistente de la madera estructural mediante ultrasonidos*. 10º Congreso Nacional de Ensayos No Destructivos, Cartagena, España, actas pp. 187-195.

**Hernández, R., Green, D.W., Kretschmann, D.E., Verrill, S.P.**, 2005. *Improved utilization of Small-Diameter Ponderosa pine in glued laminated timber*. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Research Paper FPL-RP-625, 388 p.

**Kabir, M.F.** 2001. *Prediction of ultrasonic properties from grain angle*, Journal of the Institute of Wood Science. Vol. 15, N°5 (89), pp. 235-246.

**Karsulovic, J.T.; León, L.A. y Gaete, L.** *Ultrasonic detection of knots and annual ring orientation in Pinus radiata lumber*, Wood and Fiber Science, Vol. 32, N° 3, 2000, pp. 278-286.

**Levan-Green, S., Livingston, J**, 2001. *Exploring the uses for small-diameter trees*. Forest Products Journal 51(9): 10-21.

**Lindstrom, H., Harris, P., Nakada, R**, 2002. *Methods for measuring stiffness of young trees*. Holz Als Roh-Und Werkstoff 60(3), pp. 165-174

**Mier, R.; Fernández-Golfín, J.I.; Díez, M.R.; Hermoso, E.; Iñiguez, G.; Conde, M.,** 2005. Caracterización mecánica de madera en rollo delgada de pino laricio de Cuenca. IV Congreso Forestal Español. 4CFE05-512-T1: pág. 412

**Reiterer, A.; Stanzl-Tschegg, E.; Tschegg, K,** 2000. *Mode I fracture and acoustic emission of softwood and hardwood*, Wood Science and Technology, 34, pp. 417-430.

**Ross, R.J. y Hunt, M.O.** 2000. *Stress wave timing non-destructive evaluation tools for inspecting historic structures. a guide for use and interpretacion*, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-119. Madison, WI: US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 15 p.

**Ross, R.J.; Pellerin, R.F.; Forsman, J.W.; Erickson, J.R.; Lavinder, J.A,** 2001. *Relationship between stress wave transmission time and compressive properties of timbers removed from service*. Res. Note FPL-RN-280. Madison, WI: US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 4 p.

**Sandoz, J.L,** 1989. *Grading of construction timber by ultrasound*. Wood Science and Technology, 23, pp. 95-108.

**Sik Jang, S,** 2000. *Evaluation of lumber properties by applying stress waves to larch logs grown in Korea*. Forest Products Journal. Vol. 50, nº 3, pp. 44-48.

**Wang, X.; Ross, R.J.; Mattson, J.A.; Erickson, J.R.; Forsman, J.W.; Geske, E.A.; Wehr, M.A.** 2001. *Several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and moe of small-diameter logs*. Paper FPL-RP-600. Madison, WI: US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 12 p.

**Wang, X.; Ross, R.J.; Mattson, J.A.; Erickson, J.R.; Forsman, J.W.; Geske, E.A. y Wehr, M. A,** 2002. *Nondestructive evaluation techniques for assessing modulus of elasticity and stiffness of small diameter logs*. Forest Products Journal. Vol. 52, nº 2, pp. 79-85.

**Wolfe, R,** 2000. *Research challenges for structural use of small-diameter round timbres*. Forest Products Journal. Vol. 50, nº 2 pp. 21-29.

**Wolfe, R. i Moseley, C,** 2000. *Small-diameter log evaluation for value-added structural applications*. Forest Products Journal. Vol. 50, nº 10 pp. 48-58.